

지방산을 이용한 *Nuttallia olivacea* 및 *Nereidae*의 먹이원에 관한 연구

신우석^{*} · 김부길¹⁾

일본 동북대학 대학원 공학연구과 환경생태공학 연구실, ¹⁾동서대학교 건축 · 토목공학부 토목공학과
(2010년 2월 1일 접수; 2010년 5월 11일 수정; 2010년 8월 12일 채택)

The Origin of Food Sources for *Nuttallia olivacea* and *Nereidae* by Fatty Acid Analysis

Woo-Seok Shin^{*}, Boo-Gil Kim¹⁾

Graduate school of Engineering Department of Ecological Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

(Manuscript received 1 February, 2010; revised 11 May, 2010; accepted 12 August, 2010)

Abstract

The spatial variability in the food chain structure of an estuary environment (Nanakita estuary, Japan) was investigated using fatty acid. Potential organic matter sources (terrestrial plants, macroalgae, benthic microalgae, dinflagellates and bacteria), sedimentary organic matters and benthic invertebrates (*Nuttallia olivacea* and *Nereidae*) were sampled in four locations with different tidal flat type. The main objective of the present study was to determine the origin of sediment and the food sources of *N. olivacea* and *Nereidae* along with small-scale spatial variability. The origin of sedimentary organic matters were mainly the fatty acid of bacteria and benthic microalgae. Especially, The organic matter of terrestrial plant origin was found the highest in station C. The diets of *N. olivacea* and *Nereidae* were found to be dominated by diatoms and terrestrial plants. Whereas, macroalgae and dinoflagellates showed little influence to benthic invertebrates. Moreover, according to principal component analysis, it is showed that benthic invertebrates in the same region are using the same food without relation with species. On the other hand, the *N. olivacea* and *Nereidae* of station D clearly contrasts with station B in terms of main food sources. From these results, it is suggested that food competition of benthic invertebrates revealed high a connection between small-scale spatial variability and food source in estuary.

Key Words : Estuary, Food chain, Organic matter, Benthos, Fatty acid biomarkers, Intertidal flat

1. 서 론

저서 무척추 동물은 하구 생태계의 환경 변화를 예측 가능하게 하는 생물 지시자(biomarker)이며 이차

생산자로서 중요한 위치를 차지하고 있다(Ashman 등, 2002; Holt 등, 2006). 물리 · 화학적 환경인자의 변화가 저서 무척추 동물의 공간적 분포에 미치는 영향에 대한 연구는 많다(Ito 등, 2008; Nishimura와 Sakamaki, 2009). 또한 해양과 하천으로부터 운반 및 퇴적되는 다양한 유기성 하구 갯벌 퇴적물은 저서 무척추 동물의 먹이원에 영향을 미치고(Doi 등, 2005) 전통적인 소화관 성분 분석으로 조사되었다(Eggert 등, 2000). 그러나 육안 또는 현미경으로 먹이원을 조사하는 소화

*Corresponding Author : Boo-Gil Kim, Department of Civil and Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea
Phone: +82-51-320-1790
E-mail: bookim@dongseo.ac.kr

관 성분 분석은 소형 무척추 동물에 적용하기 어렵고 유기물 기원에 대한 정보가 제한적이며 섭취된 먹이 원에 대한 분석에 한계가 있다(Kang과 Sauriau, 2000). 이러한 문제점을 보완하기 위해 동물의 먹이원 기원을 추정하는 방법으로 지방산 분석이 사용되고 있다(Alfaro 등, 2006). 일반적으로 생물의 지방산 조성은 동화한 먹이의 지방산조성을 반영하고 있기 때문에, 지방산 조성으로부터 먹이원을 추측하는 것이 가능하다. 또, 조류와 세균은 특유의 지방산을 가지고 있는 것이 알려져 있고, 이것들의 특유의 지방산은 상위의 소비자에게 동화되어도 변화가 적기 때문에, 추적자(tracer)로 이용하는 것이 가능하다(Gayoso 등, 1997).

하구 갯벌의 저서 무척추 동물은 혼탁물 식자(suspension feeder)와 퇴적물 식자(deposit feeder)로 구분된다. 혼탁물 식자와 퇴적물 식자는 먹이 섭식 양식이 다르므로 먹이 경쟁은 거의 없다고 생각되었다(栗原康, 1988). 그러나 혼탁물 식자는 식물플랑크톤뿐만 아니라 저서 부착 미소조류도 먹이원으로 이용하고 있는 것으로 밝혀지고 있다(Francis 등, 2007). 이러한 연구는 혼탁물 식자와 퇴적물 식자가 동일한 성분의 먹이원에 대한 경쟁관계로 발생할 가능성성이 있음을 의미한다.

지금까지 저서 무척추 동물의 먹이원에 대한 연구는 주로 수 km~수십 km의 대규모 하구역 또는 망그로브 수역에서 수행되었다(Alfaro 등, 2006; Bachock 등, 2003). 동일한 성분의 먹이원에 대한 동종(同種) 및 이 종(異種)간 경쟁적인 이용도를 명확히 규명하기 위하여 수십 m~수백 m 규모의 소규모 공간에서 실증적 연구를 수행할 필요성이 있다.

본 연구에서는 소규모 근접지역의 하구 갯벌에서 채취한 표층 퇴적물, 잠재적 유기물 그리고 저서 무척추 동물의 지방산을 분석하여 표층에 퇴적한 유기물의 기원 추정 및 저서 무척추 동물의 먹이원에 관하여 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 및 조사지점

본 연구는 Fig. 1의 일본 센다이시 북부 나나키타 하구역 4지점에서 수행하였다($38^{\circ}15'N$, $141^{\circ}00'E$). 나

나나키타강의 평균유량은 $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 이며, 평균유속은 지점 A, C에서 각각 0.08 ms^{-1} , 0.03 ms^{-1} 이었다. 나나키타강의 감조역(感潮域)은 하구에서 상류로 약 5 km까지 위치하고 있으며 조석의 차는 0.4~1.4 m이다. 지점 A(0.23%; Grain size($<74\mu\text{m}$))는 모래 갯벌이 형성되어 있고, 지점 B(16%)와 D(25%)는 사니질(沙泥質) 갯벌이 형성되어 있다. 게다가 지점 C(61%)는 펄 갯벌이 형성되어 있다. 유기탄소 함유량은 지점 A, B, C, D에서 각각 0.05%, 0.77%, 0.96%, 1.64%를 나타냈다(Nishimura와 Sakamaki, 2007).

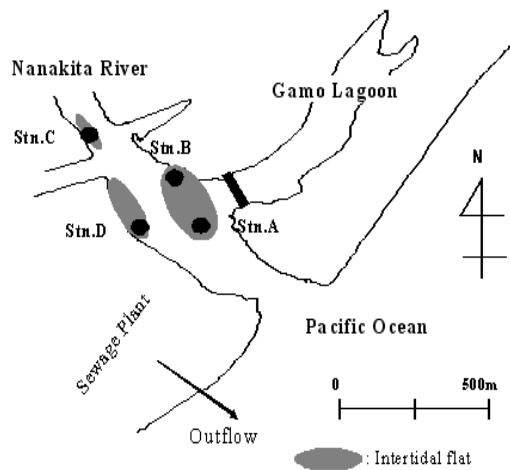


Fig. 1. The study site and sampling points in tidal flats of the Nanakita river estuary.

2.2. 시료채취 및 실험방법

표층 퇴적물 기원과 저서 무척추 동물의 먹이원 조사를 위하여 겨울철인 2009년 2월의 썰물시 Fig. 1의 조사지점에서 시료를 3회씩 채취하였다. 갯벌의 표층 퇴적물(0.5 cm)은 직경 12 cm × 높이 20 cm의 아크릴 재질 코아 샘플러를 이용하여 채취하였다. 퇴적물 함니율(silt-clay content)은 냉동·건조 후 체 분리법으로 측정하였다. TOC 함유량은 염산으로 전처리 후 원소분석장치(elementar社, vario EL III)로 측정하였다.

저서 무척추 동물은 퇴적물을 1 mm체로 분리하여 1 mm 이상의 것을 채취한 후, 혼탁물 식자와 퇴적물 식자의 우점종인 *N. olivacea*와 *Nereidae*에 함유된 지방산을 분석하였다. 단, *N. olivacea*와 *Nereidae*은 각각

지점 C와 지점 A에서 출현하지 않아 분석에서 제외시켰다. 그리고 육상식물인 갈대(*Phragmites australis*), 대형 조류인 파래(*Ulva* sp.) 및 저서 부착 미소조류(*Cylindrotheca closterium*)의 지방산을 분석하여 표층 퇴적물의 기원과 저서 무척추 동물의 잠재 먹이원에 대해 조사하였다. 분석에 사용한 갈대는 조사 지점에서 채취하였고, 파래는 시판품을 사용하였으며 저서 부착 미소조류는 f/2 배양법으로 배양하였다(須藤隆一, 1988). 본 연구에서 분석한 미소조류(*C. closterium*)는 우점종은 아니지만 현장 갯벌에서 관측이 되며, 저서 부착 미소조류(규조류)는 종에 관계없이 지방산 조성이 비슷한 특징을 가지고 있기에(Bruce와 Michael, 1999) 본 종을 분석에 이용하였다. 냉동 건조한 시료의 지방산은 Mfilinge 등(Bachok 등, 2005)의 방법으로 추출하여 가스크로마토그래피로 측정했다. 분석조건은 Table 1과 같고 표준시약의 리텐션 시간과 피크면적을 비교하여 지방산을 동정하고 정량하였다. 지방산 표준시약으로 Supelco Inc.의 제품을 사용했다. 통계 처리는 상관행렬(correlation matrix)에 의한 주성분 분석(PCA : Principal Component Analysis)을 SPSS 17.0 버전을 이용해 실시하였다. 집단간의 차이를 분석하기 위해서 one-way ANOVA test를 실시하였고 평균간 유의성은 Turkey's의 다중검정으로 검정하였다(P<0.05).

Table 1. Condition in gas chromatography for fatty acid

Gas chromatograph	GC-17A Ver.2(Shimadzu Inc.)
Capillary column	CP-Select CB for FAME(0.25mm I.D. × 100m) (GL Sciences, Inc.)
Detector	FID
Injector temperature	250 °C
Column temperature program	150 °C, 4 °C min⁻¹ to 250 °C
Carrier gas	He
H e pressure	331kPa
Chromato pack	C-R6A chromatopac(shimadzu)

3. 결과 및 고찰

3.1. TOC 함유량과 퇴적물 합니율

TOC 함유량은 조사지점에서 각각 A(0.03%), B(0.56%), C(1.95%), D(0.83%)로 지점 C에서 가장 높게 조사되었다. 퇴적물 합니율(silt-clay content, <63 μm)도 A(0.51%), B(8.80%), C(31.90%), D(12.30%)로 지점 C에서 가장 높게 나타났고, 이는 TOC 함유량과 퇴적물 합니율 간에 높은 관계를 가지고 있다는 기존 연구와 일치하고 있다(Balthis 등, 2005).

3.2. 잠재적 유기물의 지방산

잠재적 유기물(*P. australis*, *Ulva* sp., *C. closterium*)의 지방산 성상과 양을 분석한 결과 갈대는 SAFAs의 지방산이 높은 비율로 함유하고 있었으며, 파래는 PUFAAs의 비율이 타 유기물보다 높은 비율로 검출되었다. 그리고 저서 부착 미소조류인 규조류는 20 : 5ω3의 지방산이 타 유기물보다 많이 검출되어 다른 기원의 유기물의 종류에 따라 현저한 차이를 나타내었다(Table 2, ANOVA, p<0.05). 지방산 양은 저서 부착 미소조류(25.4 mgg⁻¹)에 가장 많이 함유하고 있었고 파래(18.6 mgg⁻¹), 갈대(15.1 mgg⁻¹)순으로 나타났다(Table 2). 지방산 성분은 크게 포화 지방산(SAFAAs : Saturated fatty acids), 일가 불포화 지방산(MUFAAs : Monounsaturated fatty acids), 다가 불포화 지방산(PUFAAs : Polyunsaturated fatty acids)으로 구분된다. 저서 부착 미소조류의 경우, C₁₆ 지방산 비율이 68.1%로 다른 지방산에 비해 가장 높았다. 또한 저서 부착 미소조류의 생체지표 지방산인 20 : 5ω3 지방산 비율은 2.1%로서 파래(0.8%)와 갈대(불검출)의 경우 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 저서 부착 미소조류의 지방산 성분은 C₁₆ 지방산 비율이 높고 20 : 5ω3 지방산을 소량 함유하는 기존 연구결과와 일치하였다(Eglinton 등, 1983; Colombo 등, 1996). 파래에 함유된 다가 지방산(7.6 mgg⁻¹)성분은 저서 부착 미소조류(2.0 mgg⁻¹)와 갈대(3.6 mgg⁻¹)보다 2.1~3.8배 높았다. 특히 생체지표 지방산인 18 : 2ω6와 18 : 3ω3(4.1 mgg⁻¹)은 저서 부착 미소조류와 갈대(0.3 mgg⁻¹, 3.3 mgg⁻¹)보다 풍부하게 함유하고 있었다(Table 2). 이러한 것은 대형조류에 함유된 지방산의 특징으로 보고되었다.

Table 2. Relative fatty acid composition of potential food sources at Nanakita estuary, Japan (unit: %)

Fatty acids	<i>C. closterium</i>	<i>Ulva</i> sp.	<i>P. australis</i>	Source
Saturated				
14 : 0	3.8(5.78)	0.9(0.07)	5.4(2.48)	
15 : 0	1.4(0.26)	0.6(0.12)	0.8(0.38)	
16 : 0	46.5(9.73)	40.8(1.91)	19.4(1.81)	
17 : 0	-	-	0.1(0.21)	
18 : 0	3.2(0.64)	0.4(0.23)	4.5(1.36)	
20 : 0	-	0.1(0.08)	6.5(0.33)	
21 : 0	-	-	0.3(0.29)	
22 : 0	-	0.9(0.55)	-	
23 : 0	-	-	0.4(0.36)	
24 : 0	0.5(0.22)	0.1(0.06)	1.7(0.13)	
Branched				
15 : 0 Anteiso	2.0(0.27)	0.1(0.04)	-	Bacteria(gayoso 등, 1997)
15 : 0 iso	0.3(0.28)	-	-	Bacteria(gayoso 등, 1997)
17 : 0 anteiso	0.4(0.49)	-	1.2(0.17)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
17 : 0 iso	0.1(0.22)	0.1(0.03)	-	Bacteria(gayoso 등, 1997)
Monounsaturated				
15 : 1	0.2(0.15)	-	-	
16 : 1 ω 7	20.4(5.56)	2.1(0.08)	12.2(5.74)	
17 : 1	-	0.6(0.08)	-	
18 : 1 ω 7	9.3(1.06)	10.8(0.47)	0.9(0.31)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
18 : 1 ω 9	3.8(1.42)	1.1(0.49)	16.3(0.88)	
20 : 1 ω 9	-	0.1(0.02)	0.6(0.52)	
Polyunsaturated				
16 : 2 ω 4	0.9(0.35)	0.3(0.02)	-	
16 : 3 ω 4	0.3(0.31)	0.7(0.45)	-	
18 : 2 ω 6	0.8(0.29)	6.7(0.2)	12.0(0.88)	Macroalgae(Imbs 등, 2001)
18 : 3 ω 3	0.2(0.31)	15.2(0.25)	10.2(1.15)	Macroalgae(Imbs 등, 2001)
18 : 3 ω 6	0.5(0.15)	0.3(0.37)	-	
18 : 4 ω 3	0.5(0.48)	13.2(1.04)	-	Dinoflagellates(gayoso 등, 1997)
20 : 3 ω 6	0.1(0.09)	0.2(0.05)	-	
20 : 4 ω 3	0.1(0.14)	0.5(0.62)	1.4(0.11)	
20 : 5 ω 3	2.1(0.70)	0.8(0.06)	-	Diatom(gayoso 등, 1997)
22 : 3 ω 3	-	0.2(0.02)	-	
22 : 5 ω 3	-	2.0(0.18)	-	
22 : 6 ω 3	0.1(0.14)	0.1(0.05)	-	Dinoflagellates(gayoso 등, 1997)
Σ Long chain FAs(LCFAs)	-	-	6.0(2.32)	Terrestrial plants(Alfaro 등, 2006)
Σ Essential FAs ω 3& ω 6	6.6(0.84)	39.8(5.60)	23.6(5.67)	
Σ Fatty acids, dry weight(mgg ⁻¹)	25.4(4.8)	18.6(4.6)	15.1(6.9)	

Mean (standard deviation); n=3; -: non-detected

(Gayoso 등, 1997; Imbs 등, 2001). 갈대는 당연하게 저서 부착 미소조류와 파래가 함유하지 않는 육상식 물 유래 지방산 LCFAs(Long chain fatty acids)을 많이 함유하고 있었다(Table 2). LCFAs은 고등식물 유래 육상 유기물이므로(Colombo 등, 1996; Denant 등,

1991) 최초 생산자인 저서 부착 미소조류와 파래에서 추출되지 않는다(Bavour 등, 1980; Johns 등, 1986).

3.3. 표층 퇴적물의 지방산

표층 퇴적물의 지방산은 조사 지점 C(112.9 μ gg⁻¹)

Table 3. Relative fatty acid composition in sediments from four stations at Nanakita estuary, Japan (unit: %)

Fatty acids	Station A	Station B	Station C	Station D	Source
Saturated					
14 : 0	3.1	4.4	4.6	3	
15 : 0	0.9	1.5	1.7	2.2	
16 : 0	29.3	22.5	20.8	21.6	
17 : 0	0.5	-	-	-	
18 : 0	11.2	5.3	7.4	-	
24 : 0	-	-	6.5	3	
Branched					
15 : 0 Anteiso	2	1.2	2.6	1.7	Bacteria(gayoso et al., 1997)
15 : 0 iso	1.7	1.4	3.5	2.2	Bacteria(gayoso et al., 1997)
17 : 0 anteiso	0.8	-	-	1.4	Bacteria(gayoso et al., 1997)
17 : 0 iso	0.8	-	-	-	Bacteria(gayoso et al., 1997)
Monounsaturated					
16 : 1 ω 7	12	27.3	14.8	22.5	
17 : 1	0.3	0.6	-	1.3	
18 : 1 ω 7	5.9	4.2	6.4	9.6	Bacteria(gayoso et al., 1997)
18 : 1 ω 9	19.9	4.2	-	1.2	
Polyunsaturated					
16 : 2 ω 4	1.2	2.7	2.1	2.8	
16 : 3 ω 4	0.3	2.1	-	1.9	
18 : 2 ω 6	3.2	1.4	3.2	2.2	Macroalgae(Imbs et al., 2001)
18 : 3 ω 6	-	0.3	-	-	
18 : 4 ω 3	0.4	1.2	-	-	Dinoflagellates(gayoso et al., 1997)
20 : 4 ω 6	0.5	1.4	-	1.6	
20 : 5 ω 3	2.1	13.1	6.4	13.2	Diatom(gayoso et al., 1997)
22 : 5 ω 3	-	-	-	1.2	
22 : 6 ω 3	1	1.8	-	1.8	Dinoflagellates(gayoso et al., 1997)
Σ Long chain FAs(LCFAs)	0.4	2.4	16.6	4.3	Terrestrial plants(Alfaro et al., 2006)
Σ Essential FAs ω 3& ω 6	7.2	19.2	9.6	24.1	
Σ Fatty acids, dry weight(μgg^{-1})	28.8	44.3	112.9	52.6	

Mean (standard deviation); n=3; -: non-detected

에서 가장 높았고 조사지점 A, B, D는 각각 $28.8 \mu\text{g g}^{-1}$, $44.3 \mu\text{g g}^{-1}$, $52.6 \mu\text{g g}^{-1}$ 로 나타났다(Table 3). 표층 퇴적물의 지방산 농도는 전체적으로 펠 갯벌(지점 C)이 모래 갯벌(지점 A, B, D)보다 높게 나타났다. C지점의 저니 퇴적물 내 유기물 함량이 모래 갯벌(A, B, D)보다 높으므로 지방산 농도가 증가한 것으로 판단된다(Balthis 등, 2005). 그리고 지점 C의 유속이 다른 지점보다 느린 것도 하나의 영향인자로 생각된다(Nishimura와 Sakamaki, 2009). 저서 부착 미소조류의 생체지표가 되는 20 : 5 ω 3 지방산 농도는 모래 갯벌(지점 A)의 $0.6 \mu\text{g g}^{-1}$ 보다 펠 갯벌(지점 C)에서 $7.2 \mu\text{g g}^{-1}$ 로 높게 나타났다(Table 3, Fig. 2). 또 다른 생체

지표인 박테리아 지방산(15 : 0 iso, 15 : 0 anteiso, 17 : 0 iso, 17 : 0 anteiso, 18 : 1 ω 7)도 지점 C($14.1 \mu\text{g g}^{-1}$)가 A($3.2 \mu\text{g g}^{-1}$), B($3.0 \mu\text{g g}^{-1}$), D($7.8 \mu\text{g g}^{-1}$)에서 보다 높게 나타났다. 저서 부착 미소조류가 많이 존재하는 지점 C에 이를 섭취하는 박테리아도 다량으로 존재한다고 판단되며, 박테리아 및 미생물은 유기물량과 상관관계가 높은 기존 연구와 일치했다(Lee 등, 1999). 육상식물 유래 지방산인 LCFAs는 갈대가 다량으로 존재하는 지점 C($18.7 \mu\text{g g}^{-1}$)에 월등하게 많이 검출되었고, D($2.3 \mu\text{g g}^{-1}$), B($1.1 \mu\text{g g}^{-1}$), A($0.1 \mu\text{g g}^{-1}$) 순으로 낮게 나타났다. 해양에서 가장 먼 지점 C에서 대형조류의 생체지표 지방산인 18 : 2 ω 6, 18 : 3 ω 3가

$3.6 \mu\text{gg}^{-1}$ 으로 가장 높게 나타났다. 지점 C는 다른 지점과 달리 갈대군락이 넓게 형성되어 있고 조류대 등의 육상식물이 다양으로 번식하고 있는 것에 기인하는 것으로 생각된다(Table 3). 와편모조류의 생체지표 지방산인 18 : 4ω3, 22 : 6ω3은 지점 A($0.4 \mu\text{gg}^{-1}$), B($1.3 \mu\text{gg}^{-1}$), D($0.9 \mu\text{gg}^{-1}$)에서는 적은 양이 검출 되었지만 지점 C에서는 불검출 되었다. 이러한 결과로부터 표층 퇴적물의 지방산 성상과 양은 조사 지점에 따라 퇴적하는 유기물의 기원의 차이의 영향을 받아 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 2, ANOVA; $p < 0.05$).

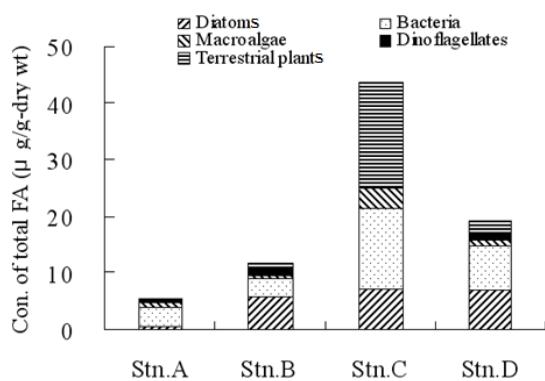


Fig. 2. Fatty acid concentration of main food sources in sediments collected within four stations at Nanakita estuary ($n=1$).

3.4. 저서 무척추동물의 지방산

저서 무척추 동물 *N. olivacea*와 *Nereidae*의 지방산 성상을 Table 4에 나타내었다. *N. olivacea*에 의해 동화된 지방산은 조사 지점 A(13.6 mgg^{-1}), B(14.2 mgg^{-1}), D(25.5 mgg^{-1})에 따라 차이를 나타내었다(Table 4). 저서 부착 미소조류의 생체지표 지방산은 조사 지점 B(0.7 mgg^{-1}), A(0.8 mgg^{-1}), D(3.5 mgg^{-1})순으로 나타났다(Fig. 3). 박테리아와 와편모조류의 생체지표 지방산도 지점 A($0.8, 0.9 \text{ mgg}^{-1}$), B($1.1, 0.6 \text{ mgg}^{-1}$)보다 지점 D($1.6, 2.3 \text{ mgg}^{-1}$)에서 많았다. 그리고 대형 조류의 생체지표 지방산은 지점 A, B의 *N. olivacea*에는

검출되지 않았고 지점 D의 *N. olivacea*에 0.3 mgg^{-1} 가 검출되었다. LCFAs는 지점 A(0.9 mgg^{-1})의 *N. olivacea*에 가장 많이 검출되었다(Fig. 3). *N. olivacea*의 주 먹이원인 와편모조류의 지방산($0.6 \sim 2.3 \text{ mgg}^{-1}$) 보다 저서 부착 미소조류의 지방산($0.7 \sim 3.5 \text{ mgg}^{-1}$)이 높게 나타났다. 이는 조석에 의한 하구역의 저서 퇴적 층과 함께 부유된 저서 부착 미소조류를 *N. olivacea*가 이용하는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 와편모조류와 같은 식물플랑크톤과 저서 부착 미소조류가 혼탁물 식자의 중요한 먹이원으로 인식 되는 것과 일치하고 있다(Francis 등, 2007). 그리고 박테리아($0.7 \sim 1.6 \text{ mgg}^{-1}$)와 파래(불검출~ 0.3 mgg^{-1})의 지방산이 저서 부착 미소조류($0.7 \sim 3.5 \text{ mgg}^{-1}$)와 와편모조류($0.6 \sim 2.3 \text{ mgg}^{-1}$)보다 적은 이유는 혼탁물 식자가 파래를 직접적인 먹이원으로 이용하기 어렵기 때문이다. 모든 지점의 *N. olivacea*로부터 검출된 지방산은 기존의 연구결과와 같이 수중의 부유물질과 조석에 의해 부유된 저서 부착 미소조류에 기인하는 것으로 나타났다(Alfaro 등, 2006; Kasai와 Nakata, 2005).

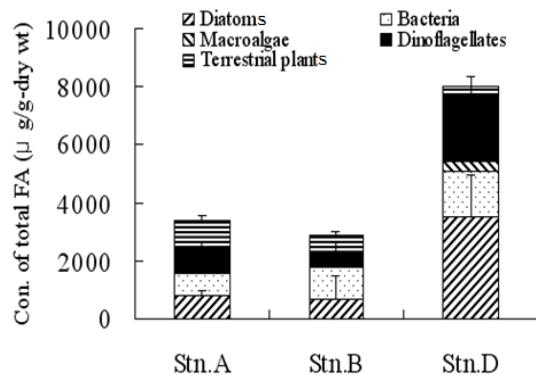


Fig. 3. Fatty acid concentration of main food sources in *N. olivacea* collected within three stations at Nanakita estuary ($n=3$).

*Nereidae*에 의해 동화된 지방산 양은 조사 지점 B(14.4 mgg^{-1}), C(19.8 mgg^{-1}), D(22.5 mgg^{-1})에 따라 차이를 나타내었다(Table 4). 저서 부착 미소조류와 와편모조류의 생체지표 지방산은 조사 지점 D($5.0, 0.5 \text{ mgg}^{-1}$), C($3.2, 0.2 \text{ mgg}^{-1}$), B($1.2, 0.2 \text{ mgg}^{-1}$)순으로 나타났다(Fig. 4). 반면, *Nereidae*의 LCFAs와 대형조류의

Table 4. Relative fatty acid composition in invertebrate samples from four stations at Nanakita estuary, Japan (unit: %)

Fatty acids	<i>N. olivacea</i>			<i>Nereidae</i>			Source
	Station A	Station B	Station D	Station B	Station C	Station D	
Saturated							
14 : 0	3.6(2.39)	2.7(0.21)	5.7(0.04)	2.3(0.64)	1.9(0.51)	1.5(0.48)	
15 : 0	2.5(0.02)	3.0(0.31)	1.4(0.14)	2.3(0.79)	1.5(0.21)	1.4(0.78)	
16 : 0	31.2(7.45)	36.0(8.12)	26.6(1.24)	35.8(18.01)	33.5(7.50)	21.4(4.37)	
17 : 0	0.3(0.58)	0.9(0.81)	1.2(0.12)	-	-	-	
18 : 0	17.4(0.71)	15.1(2.84)	8.7(0.17)	13.5(5.07)	-	9.7(3.00)	
20 : 0	-	-	-	-	-	0.1(0.13)	
21 : 0	-	-	0.1(0.11)	-	2.3(2.01)	-	
Branched							
15 : 0 Anteiso	-	-	0.2(0.14)	0.4(0.32)	-	0.2(0.19)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
15 : 0 iso	-	-	0.1(0.12)	0.1(0.19)	-	-	Bacteria(gayoso 등, 1997)
17 : 0 anteiso	2.8(0.19)	3.8(1.27)	1.9(0.35)	2.2(1.08)	1.6(0.65)	0.9(0.27)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
17 : 0 iso	0.9(0.10)	0.9(0.81)	0.6(0.10)	1.0(0.38)	0.3(0.55)	0.2(0.18)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
Monounsaturated							
15 : 1	-	0.8(0.73)	0.5(0.12)	-	-	0.2(0.41)	
16 : 1 ω 7	3.5(0.90)	4.6(1.79)	12.0(1.77)	4.2(1.17)	3.9(1.26)	5.5(1.46)	
17 : 1	-	-	0.1(0.14)	-	-	0.2(0.21)	
18 : 1 ω 7	1.8(0.36)	2.7(0.32)	3.4(0.11)	4.0(1.99)	4.4(1.10)	5.1(0.22)	Bacteria(gayoso 등, 1997)
18 : 1 ω 9	4.0(1.43)	4.7(0.65)	3.3(0.84)	6.9(1.17)	4.9(3.33)	9.4(3.54)	
20 : 1 ω 9	2.1(0.21)	2.8(0.90)	1.4(0.06)	4.3(1.85)	4.4(0.69)	2.5(0.66)	
Polyunsaturated							
16 : 2 ω 4	0.8(0.67)	0.3(0.52)	0.2(0.35)	2.5(2.72)	3.3(1.12)	1.7(0.68)	
16 : 3 ω 4	-	-	0.3(0.09)	0.1(0.17)	-	0.1(0.13)	
18 : 2 ω 6	-	-	0.8(0.06)	1.7(2.23)	3.7(2.30)	2.0(1.07)	Macroalgae(Imbs 등, 2001)
18 : 3 ω 3	-	-	0.4(0.06)	0.1(0.14)	-	0.5(0.06)	Macroalgae(Imbs 등, 2001)
18 : 4 ω 3	0.1(0.25)	-	1.2(0.14)	-	-	-	Macroalgae(Imbs 등, 2001)
20 : 2 ω 6	0.7(0.64)	0.7(0.59)	1.4(0.06)	0.9(0.76)	-	2.1(0.17)	
20 : 3 ω 6	-	-	0.1(0.12)	0.2(0.36)	-	-	
20 : 4 ω 3	-	-	-	-	-	0.1(0.11)	
20 : 4 ω 6	5.1(2.09)	3.7(3.06)	2.7(0.06)	2.8(3.18)	6.9(2.95)	3.2(1.66)	
20 : 5 ω 3	6.0(0.43)	4.8(4.99)	13.7(0.89)	8.2(10.93)	16.3(5.34)	22.2(2.31)	Diatom(gayoso 등, 1997)
22 : 3 ω 3	1.0(0.83)	0.5(0.94)	0.2(0.29)	-	-	-	
22 : 5 ω 3	1.3(1.09)	1.1(1.40)	0.5(0.89)	0.8(1.43)	-	2.6(0.29)	
22 : 6 ω 3	6.6(2.39)	4.1(4.08)	7.9(0.05)	1.4(1.18)	1.2(1.09)	2.1(0.06)	Dinoflagellates(gayoso 등, 1997)
Σ Long chain FAs(LCFAs)	6.4(1.46)	3.7(0.66)	1.3(0.61)	2.8(1.35)	10.1(3.13)	3.4(2.95)	Terrestrial plants(Alfaro 등, 2006)
Σ Essential FAs ω 3& ω 6	20.8(2.80)	14.9(1.92)	28.9(4.45)	16.1(2.65)	28.1(6.61)	34.8(7.29)	
Σ Fatty acids, dry weight (mg g^{-1})	13.6(2.2)	14.2(1.7)	25.5(8.9)	14.4(2.9)	19.8(10.0)	22.5(2.5)	

Mean (standard deviation); n=3; -: non-detected

생체지표 지방산은 지점 C($2.0, 0.7 \text{ mgg}^{-1}$)에서 가장 많 은 양을 나타내었다(Fig. 4). 박테리아의 생체지표 지 방산은 조사 지점 B(1.1 mgg^{-1}), C(1.2 mgg^{-1}), D(1.4 mg g^{-1})에서 비슷한 값을 나타내었다(Fig. 4). 와편모조류 생체지표 지방산은 *Nereidae*에 포함된 생체지표 지방 산 중에서 가장 적게 나타났다. 이 결과는 식물플랑크 톤인 와편모조류는 유영성 조류이므로 퇴적되기 어렵 고 분해속도가 타 유기물보다 빠르고, 조사 시기가 겨 울이라 퇴적 양도 적어 퇴적물 식자에 이용되기 어렵 웠기 때문인 것으로 사료된다(Duarte 등, 1993). 각 조 사 지점의 *Nereidae*로부터 검출된 지방산 분석 결과 저서 부착 미소조류와 박테리아 및 육상식물 유래 지 방산이 높은 비율로 검출되었고, 이러한 경향은 기존 연구 결과와 유사하였다(Doi 등, 2005; Ahlgren 등, 2000).

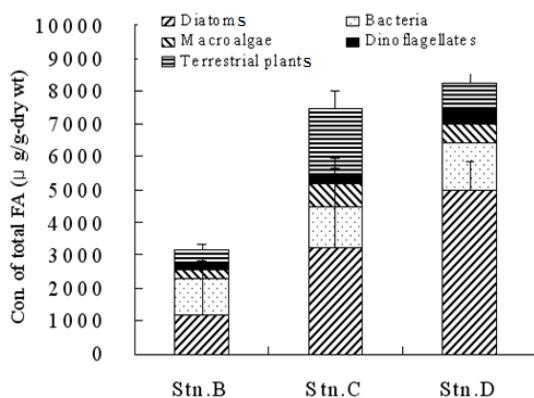


Fig. 4. Fatty acid concentration of main food sources in *Nereidae* collected within three stations at Nanakita estuary ($n=3$).

3.5. 주성분 분석을 통한 저서 무척추동물의 먹이원 추정

주성분 분석(PCA)을 통해 저서 무척추 동물과 먹 이원과의 관계를 규명하고자 하였다(Fig. 5). PC1(주 성분 1)과 PC2(주성분 2)는 저서 무척추 동물의 지방 산 농도 변화에 대해서 각각 56.18%, 29.31%로 나타 났다. 고유치는 PC1에서 2.81, PC2에서 1.49를 나타 냈다. PC1은 저서 부착 미소조류의 영향을 PC2는 와 편모조류의 영향을 나타내고 있다. PC1, PC2에서 지 점D의 *Nereidae* (III)와 지점D의 *N. olivacea* (VI)는 박테리아, 저서 부착 미소조류 그리고 와편모조류와

양(+)의 관계를 나타냈고, 지점C의 *Nereidae* (II)는 PC1과는 양(+)의 관계지만 PC2에서는 음(-)의 관계 를 가지는 육상식물과 대형조류의 생체지표 지방산의 영향을 받고 있었다(Fig. 5). 반면 지점B의 *Nereidae* (I), 지점B의 *N. olivacea* (V) 그리고 지점A의 *N. olivacea* (IV)는 PC1과 PC2에서 음(-)의 관련을 나타 냈다. 이처럼 조사 지점의 저서 무척추 동물과 먹이원 의 생체지표 지방산과의 공간적 관계를 보면 지점 A, B의 저서 무척추 동물은 어느 기원 유기물 하나에 크 게 의존하지 않는 특성을 나타낸 반면 지점 C의 저서 무척추 동물은 육상유래 유기물의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 게다가 지점 D의 저서 무척추 동물은 내부생산 유기물에 영향을 받는 특징을 나타내 크 게 세 부분으로 나눌 수 있었다(Fig. 5). 수십 m ~ 수 백 m 규모의 소규모 공간에서 근접지역의 먹이원 섭 취양상은 유사할 것으로 추정하였지만 조사지점에 따 라 크게 다른 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 밀 접한 지역에서도 물리적, 계절적 등 환경적인 영향에 따라 먹이원 섭취 양상에 영향을 크게 받고 있는 것으 로 사료되었다.

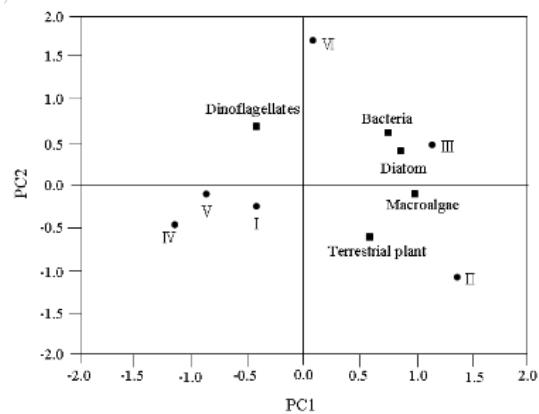


Fig. 5. Index of principle component analysis as for trophic makers (I : *Nereidae* of station B, II : *Nereidae* of station C, III : *Nereidae* of station D, IV : *N. olivacea* of station A, V : *N. olivacea* of station B, VI : *N. olivacea* of station D).

4. 결 론

지방산 분석을 통하여 퇴적 유기물의 기원과 함께

갯벌에 서식하고 있는 저서 무척추 동물의 먹이원을 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 표층 퇴적물 지방산은 합니율이 높은 지점 C($112.9 \mu\text{gg}^{-1}$)에서 가장 높았고 지점 A, B, D는 각각 $28.8 \mu\text{gg}^{-1}$, $44.3 \mu\text{gg}^{-1}$, $52.6 \mu\text{gg}^{-1}$ 로 나타났다.
- 2) 각 표층 퇴적유기물의 기원은 주로 박테리아와 저서 부착 미소조류에 기인한 것이었고, 지점 C에서는 육상식물 유래 지방산이 타 지역보다 높게 검출되어 육상식물에서 기인한 것으로 생각되었다.
- 3) *N. olivacea*와 *Nereidae*의 주 먹이원은 각각 와편모조류와 같은 식물플랑크톤과 부유되는 저서 부착 미소조류 및 육상식물 유래 유기물로 조사되었다.
- 4) *N. olivacea*와 *Nereidae*는 둘 다 저서 부착 미소조류를 먹이원으로 이용하고 있어 저서 부착 미소조류 등 환경적 요인이 이종(異種)간의 먹이원 경쟁을 유발시킬 수 있다.
- 5) *N. olivacea*와 *Nereidae*의 먹이원에 대한 공간적 특징에 따라 생체지표 지방산의 종류와 성상에 영향을 미쳤다.

하구 생태계의 환경 변화를 예측할 수 있는 저서 무척추 동물의 먹이원과 관련해 향후 계절적인 요인 등 환경적인 영향 인자에 관한 추가적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- Ahlgren, G., Boberg, M., Goedkoop, W., Sonesten, L., 2000, Fatty acids in profundal benthic invertebrates and their major food resources in Lake Erken, Sweden : seasonal variation and trophic indications, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 57, 2267-2279.
- Alfaro, A. C., Alfaro, T. F., Duxbury, M., Sergent, L., 2006, Identification of trophic interactions within an estuarine food web (northern New Zealand) using fatty acid biomarkers and stable isotopes, Estuarine Coastal and Shelf Science, 70, 271-286.
- Ashman, C. M., Brown, A. R., Clarke, K. R., Dowell, B., Hart, B., Lewis, R. E., Shillabeer, N., Somerfield, P. J., Tapp, J. F., Warwick, R. M., 2002, Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary, UK, associated with local and regional environmental events, Marine Ecology Progress Series, 234, 1-13.
- Bachock, Z., Mfilinge, P. L., Tsuchiya, M., 2003, The diet of the mud clam *Geloina coxans* (Mollusca, Bivalvia) as indicated by fatty acid markers in a subtropical mangrove forest of Okinawa, Japan, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 292, 187-197.
- Bachok, Z., Meziane, T., Mfilinge, P. L., 2005, Litter dynamics and particulate organic matter outwelling from a subtropical mangrove in Okinawa Island, South Japan, Estuarine Coastal and Shelf Science, 63, 301-313.
- Balthis, L., Hyland, J., Karakassis, I., Magni, P., Petrov, A., Shine, J., Vestergaard, O., Warwick, R., 2005, Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos, Marine Ecology Progress Series, 295, 91-103.
- Bavour, H. J., Gillan, F. T., Johns, R. B., Perry, G. J., Volkman, J. K., 1980, Microbial lipids of an intertidal sediment-1. Fatty acids and hydrocarbons, Geochimica et Cosmochimica Acta, 44, 1133-1143.
- Bruce, C. W., Michael, T. A., 1999, Lipids in freshwater ecosystems, Springer, 23-26.
- Colombo, J. C., Gearing, J. N., Silverberg, N., 1996, Lipid biogeochemistry in the Laurentian Trough 1. Fatty acids, sterols and aliphatic hydrocarbons in rapidly settling particles, Organic Geochemistry, 25, 211-225.
- Denant, V., Filliaux, J., Laureillard, J., Saliot, A., Scribe, P., 1991, Fatty acids as biomarkers of planktonic inputs in the stratified estuary of the Krka river, Adriatic sea: relationship with pigments, Marine Chemistry, 32, 299-312.
- Doi, H., Kikuchi, E., Maki, Y., Matsumasa, M., Mizota, C., Satoh, N., Toya, T., 2005, Spatial shifts in food sources for macrozoobenthos in an estuarine ecosystem: Carbon and nitrogen stable isotope analyses, Estuarine Coastal and Shelf Science, 64, 316-322.
- Duarte, C. M., Enriquez, S., SandJensen, K., 1993, Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content, Oecologia, 94, 457-471.
- Eggert, S. L., Robert, O. Hall Jr., Wallace, J. B., 2000,

- Organic matter flow in stream food webs with reduced detrital resource base, *Ecology*, 81, 3445-3463.
- Eglinton, G., Morris, R. J., Smith, D. J., 1983, The lipid chemistry of an interfacial sediment from the Pericontinental shelf. Fatty acids, alcohols, aliphatic ketones and hydrocarbons, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 2225-2232.
- Francis, O., Julio, C. M. L., Michel, R., Sébastien, L., Stanislas, D., 2007, Small-scale spatial variability of food partitioning between cultivated oysters and associated suspension feeding species, as revealed by stable isotopes, *Marine Ecology Progress Series*, 336, 151-160.
- Gayoso, A. M., MacDonald, B. A., Napolitano, G. N., Pollero, R. J., Thompson, R. J., 1997, Fatty acids as trophic markers of phytoplankton blooms in the Bahia Blanca Estuary (Buenos Aires, Argentina) and Trinity Bay (Newfoundland, Canada), *Biochem Syst. Ecol.*, 25, 739-755.
- Holt, S. A., Rooker, J. R., Turner, J. P., 2006, Trophic ecology of Sargassum-associated fishes in the Gulf of Mexico determined from stable isotopes and fatty acids, *Marine Ecology Progress Series*, 313, 249-259.
- Imbs, A. B., Kharlamenko, V. I., Kiyashko, S. I., Vyshkvertzev, D. I., 2001, Identification of food sources of invertebrates from the seagrass Zosteromarina community using carbon and sulfur isotope ratio and fatty acid analyses, *Marine Ecology Progress Series*, 220, 103-117.
- Ito, K., Komizunai, N., Omori, M., Shirase, T., Tomiyama, T., 2008, Spatial intertidal distribution of bivalves and polychaetes in relation to environment conditions in the Natori River estuary, Japan, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 80, 243-250.
- Johns, R. B., Klumpp, D. W., Nichols, P. D., 1986, Lipid components and utilization in consumers of a seagrass community: an indication of carbon source, *Comparative Biochemistry and Physiology*, 83, 103-113.
- Kang, C. K., Sauriau, P. G., 2000, Stable isotope evidence of benthic microalgae-based growth and secondary production in the suspension feeder *Cerastoderma edule* (Mollusca, Bivalvia) in the Marennes-Oléron Bay, *Hydrobiologia*, 440, 317-329.
- Kasai, A., Nakata, A., 2005, Utilization of terrestrial organic matter by the bivalve *Corbicula japonica* estimated from stable isotope analysis, *Fisheries Science*, 71, 151-158.
- Lee, J. G., Nishijima, W., Okada, M., 1999, Study on selection of location in constructed tidal flat and controlling factors on soil structure, *Journal of Japan Society on Water Environment*, 22, 595-599.
- Nishimura, O., Sakamaki, T., 2007, Physical control of sediment carbon content in an estuarine tidal flat system (Nanakita River, Japan) : A mechanistic case study, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 73, 781-791.
- Nishimura, O., Sakamaki, T., 2009, Is sediment mud content a significant predictor of macrobenthos abundance in low-mud-content tidal flats?, *Marine and Freshwater Research*, 60, 160-167.
- 栗原康, 1988, 河口海岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版社, 85.
- 須藤隆一, 1988, 環境微生物実験法, 講談社サイエンティフィック, 47.